第43卷 第2期
2000年5月

昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA

Vol.43, No.2
May, 2000

文章编号：0454-6296（2000）02-0176-08

中国盛夏褐飞虱北迁过程的动态数值模拟

包云轩[1]，　程极益[1]，　程遐年[1]　储长树[2]，　沈桐立[2]
（1.南京农业大学，南京　210095；2.南京气象学院，南京　210044）

摘要：以控制和影响褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）迁飞过程的生理生态参数为依据，应用时空分辨率较高的中尺度数值预报模式—MM4 和三维轨迹计算方法对我国盛夏褐飞虱的北迁过程进行了动态模拟。模拟结果及其与实测虫情资料的对比研究表明：（1）我国盛夏褐飞虱北迁的虫源地主要在 22.5°N～27°N，110°E～116°E 之间。（2）空中迁飞路径有三条：主径取 32°方位角，副径分别取 10°和 75°方位角。（3）降落虫汇区有三个：主降区为长江中下游稻区，副降区分别为鄂西北、川东北稻区和浙东南、闽北稻区。（4）理论模拟与实际虫情普查分析比较吻合，说明该模型可作为迁飞害虫灾变机制研究的一个重要工具。

关键词：褐飞虱；迁飞；动态数值模拟；三维轨迹分析；迁飞参数
中图分类号：Q968.1　　**文献标识码**：A

褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）是危害水稻的重要害虫之一，具群聚性、远距离迁飞性和为害突发性，它广泛分布于中国、日本、朝鲜半岛、东南亚、南亚、太平洋岛屿和澳大利亚等国家和地区。在我国，褐飞虱每年冬春季仅局限于两广南部、台琼诸岛和云南南部的热带地区存活与为害；春夏之交开始北迁并陆续降落与为害江南大部；盛夏北迁至江淮流域及其以北地区，降落并为害全国各水稻主要生长区；夏末秋初开始回迁，并继续降落与为害上述部分地区。每年这种周期性的北迁南返与为害给我国水稻生产造成了较大的危害，尤其是大发生年，稻米损失更为惨重。盛夏，褐飞虱降落与为害的区域最广、水稻受害也最严重，因此，研究我国盛夏褐飞虱北迁过程就显得特别重要。

昆虫三维迁飞轨迹的研究始于 1983 年，当时美国学者 Demino *et al*.（1983）用 Reap（1972）研制的六层大尺度大气扩散三维轨迹模型 SET[1] 首次推算出了小地老虎迁入美国依阿华州的三维轨迹[2]。之后，Wolf *et al*.（1987）也用该模式模拟出了苜蓿绿夜蛾迁入美国和加拿大的轨迹[3]。进入 90 年代以来，国外对三维轨迹的研究鲜见报道。国内，胡继超等（1997）首次应用时空分辨率较高的中尺度气象数值预报模式 MM2（MM4 的前身）对我国东部秋季回迁的褐飞虱进行了三维轨迹研究，并对以南京空中某层为起、终点的昆虫 12 h 二、三维顺、逆推迁飞轨迹作了对比分析，最后用雷达观测资料进行了验证，证实了三维轨迹比二维更精确、反映的迁飞特征也更全面[4]。

资金项目：国家基础性研究重大关键项目“粮棉作物五大病虫害灾变规律及控制技术的基础研究”中的子专题“褐飞虱大发生的生理生态因素研究”
收稿日期：1999-03-05；修订日期：1999-07-05

前几年，我们进行了双雷达昆虫迁飞观测、氦气球空中网捕采样、琼斯高塔吸虫、田间虫情普查分析和二维迁飞轨迹模拟等研究，获得了许多较有价值的结果[5~8]。为了进一步了解褐飞虱的迁飞和灾变规律、揭示其大发生的生理生态机制，本研究在总结前人工作的基础上应用 80 年代末从美国引进的中尺度气象动力数值预报模式——MM4[9]，模拟出了 1991 年 7 月发生在我国的两个典型的褐飞虱北迁过程中昆虫在不同时次从不同地区迁出、在不同层次飞行、到达不同降落区的顺、逆推三维迁飞轨迹 144 条，并对这些轨迹的特征进行了综合分析，确定出理论上褐飞虱北迁的虫源区、迁飞路径和降落区，最后将这些结果与实测虫情资料进行对比分析，验证了该模型的精确度。

1　资料与方法

1.1　资料来源

褐飞虱虫情资料为农业部全国病虫害综合治理开放实验室提供的 1971～1995 年期间褐飞虱虫情普查资料，其中重点分析了 1991 年 7 月全国 49 个植保站的褐飞虱灯下诱捕量资料和田间虫情调查资料。

气象资料为南京气象学院实习气象台和江苏省气象台提供的 1991 年 7 月 11～16 日、18～23日每天 00GMT 和 12GMT 两个时次、10°N～50°N 与 50°E ～140°E 范围内 600 多个气象台站的高空和地面资料，这些资料经格式转换、检误及客观分析后有 270 多个台站的气象资料在模式所选网格区内真正有效。

1.2　方法

1.2.1　MM4模式简介：中尺度模式 MM4（Mesoscale Model Version 4.0）是 80 年代末由美国宾夕法尼亚州立大学（PSU）和美国国家大气研究中心（NCAR）联合研制的一个适合于有限区域的、多功能的、高分辩率的中尺度动力气象数值预报模式，目前已广泛应用于西方国家的气象、环保等部门[10~11]。在我国该模式已开始普遍应用于气象系统的中期和短期天气预报、中尺度暴雨试验、各种气象要素和环境物理量预报、区域气候数值模拟等[12~14]。模式中包容海陆分布、地形、植被、海温、气象要素等多方面的信息，兼顾大、中、小不同尺度的天气系统和各种各样的环境背景，对边界层物理过程有较好的处理方案，可作天气预报、传播性病菌及迁飞性害虫的三维动态模拟、风载污染物的轨迹计算、降水分析、气象要素场分析等，是目前世界上比较先进的中尺度数值预报工具之一，其系统运行流程参见图 1。

1.2.2　褐飞虱三维迁飞轨迹计算方法介绍：轨迹分析既可用于污染气象学中计算大气污染物和放射性物质的长距离输送，用于天气学中气块运行轨迹计算，也可用于卫生防疫学和植物保护学中计算病菌和迁飞性害虫的传播与迁移[15]。本模型在对实测气象资料进行格式转换、检误、客观分析、垂直内插和初始化后，产生边界条件、运行主模式、诊断分析、输出了每小时一次的气象要素预报场。然后，以适宜于褐飞虱迁飞的生理生态条件为前提，采用动力气象学中常用的三维空气质点轨迹计算方法对褐飞虱夏季北迁的顺、逆推轨迹进行了研究。计算步骤是：（1）根据 MM4 主模式运行的结果及褐飞虱生理上适应的迁飞高度对地面到 3 600 m高度之间每 300 m 一层的各层次用拉格朗日插值法作温度、位势高度、经纬向水平风分量和垂直速度的内插。（2）将 σ 坐标系中产生的垂直速度 ω 场转变为直角坐标系中以 m/s

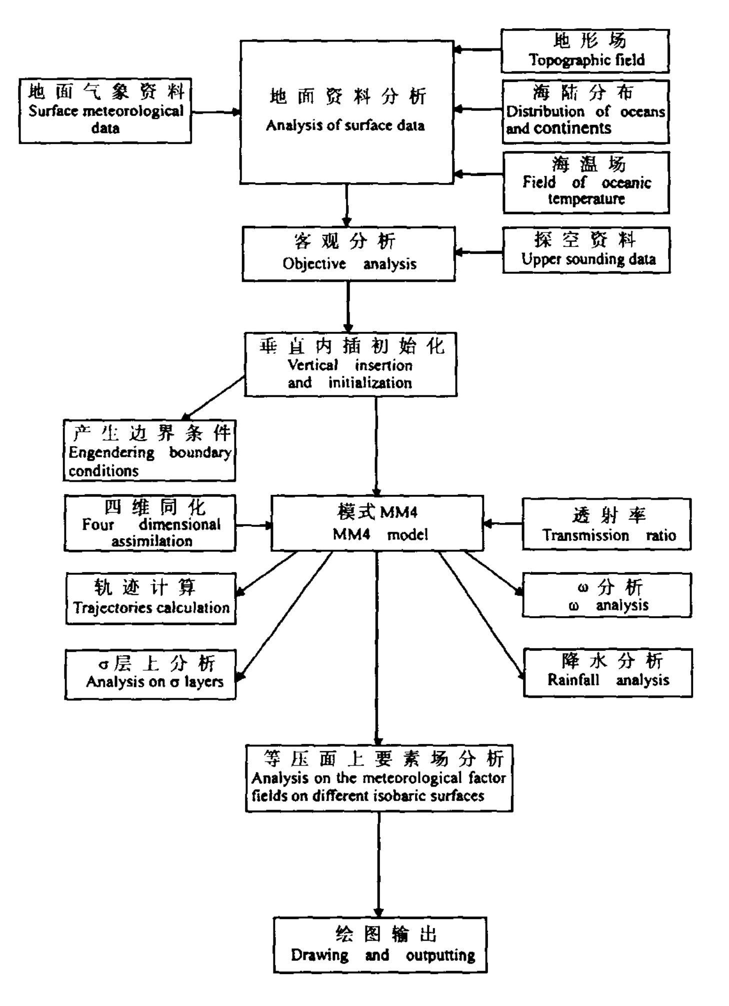


图1 MM4模式运行流程

Fig. 1 The technological process of operating MM4

为单位的ω（垂直速度）场，并将以气压p（hpa）表示的垂直高度转换为以m为单位的通用高度。(3) 从轨迹起点开始，以1 h为时步，连续24 h、32 h或其它历时（根据轨迹运行状况而定）计算各时步经向、纬向及垂直方向的速度和位移。(4) 将各时次轨迹点用折线连接起来，即得所求的轨迹线。所有轨迹计算完成后再将轨迹图形（包括三维轨迹曲线及其在各平面上的投影）用NCARGKS绘图软件输出打印。

1.2.3 褐飞虱迁飞轨迹参数的选择与拟定：顺推轨迹计算时，轨迹起点选择为：(1) 以广西全州为实测虫源地代表；(2) 以强上升气流中心为理论虫源地代表；(3) 以上升气流区边界上的点代表理论虫源区边界。轨迹起点高度选择：(1) 源地15℃层高度代表褐飞虱成层迁飞的上限；(2) 源地18℃层高度代表最适迁飞层高度；(3) 源地22℃层高度代表成层迁飞下限高度。轨迹计算的时间起点选择：(1) 以16时代表成层始迁时次；(2) 以18时代表峰前迁出时次；(3) 以20时代表峰后迁出时次；(4) 以22时代表迁出的终了时次。

逆推轨迹计算时，轨迹起点选择：(1) 以江苏江宁县的点（31°59′N，·118°37′E）为实测

主降区中心（用内五点外五点筛选法普查虫情资料确定）；（2）以长江中下游地区的强下沉气流区中心为理论主降区代表；（3）以下沉区最北界代表褐飞虱迁飞可到达的最北位置，下沉区边界上其它点代表褐飞虱理论降落区边界。轨迹起点高度选择：（1）降落区 15℃层代表迁飞层最终上限高度；（2）降落区 18℃层代表最适迁飞层最终高度；（3）降落区 22℃层代表迁飞层最终下限高度。轨迹计算时间起点选择：（1）以次日 22 时代表褐飞虱迁飞层最终降落时次；（2）以次日 20 时代表降落的峰后时次；（3）以 18 时代表降落的峰前时次；（4）以 16 时代表初降（即初始迁入）时次。

顺、逆推轨迹的时步、总历时的选择及迁飞距离的确定：两种轨迹时间步长都取 1 h。迁飞总历时根据轨迹在垂直气流上升区和下沉区的位置选择为：（1）24 h；（2）32 h；（3）起始时次至轨迹高度为零时次或至为零前一时刻；（4）起始时次至轨迹入海时次或至入海前一时刻；（5）40 h（主要了解外界条件满足时，从源区南界迁出的褐飞虱单体到达最北界时的轨迹历程）。时步、历时选好后，确定总历时内每小时轨迹的空间位移总和为迁飞距离（以 km 为单位）。

迁飞速率、迁飞角度及迁飞高度的计算：以轨迹计算迭代完后各小时三维风速矢量的绝对值代表迁飞速率。以正北方位为零起点，顺时针方向为正、逆时针方向为负，计算各轨迹段的方位角；以朝水平正北方向为零起点，向上转为正，向下转为负，计算经向仰角；以朝水平正东方向为零起点，向上转为正，向下转为负，计算纬向仰角（三个角度合成后为迁飞角度）。迁飞高度确定时，将各次迭代后的终了点即各轨迹段的末端点位置的无量纲垂直坐标转换为以 m 为单位的高度值就是迁飞高度。

2　结果及分析

2.1　轨迹模拟结果及分析

本研究模拟计算了 1991 年 7 月两个典型的褐飞虱北迁过程中昆虫种群在不同时次、从不同地区迁出、在不同层次飞行、到达不同降落区的顺、逆推轨迹共 144 条，从理论上推断分析了褐飞虱的迁出虫源地、空中迁飞路径和降落区，研究了迁飞速率、迁飞层高度、迁飞层厚度、迁飞角度、迁飞历时和迁飞距离等迁飞轨迹参数的时空变化规律（另文发表），分析了不同轨迹间的差异及风场、温场、高度和天气背景等对褐飞虱迁飞的影响[16]，并用实测虫情资料对理论研究结果作了印证。

图 2 是从模拟出的 144 条褐飞虱三维北迁轨迹中随机抽样的三条，其中图2:a 是 1991 年 7 月 13 日 16 时从实测虫源地中心迁出后在迁飞层顶飞行 24 h 后降落于下沉气流区东北界的轨迹，图 2:b 是 7 月 13 日 20 时从上升气流区中心迁出后在最适迁飞层中飞行 24 h 降落于下沉气流区中心的轨迹，而图2:c 则是 7 月 20 日 16 时从虫源区南界迁出后在迁飞层底飞行 32 h 后降落于下沉气流区中心的轨迹。这些轨迹比较逼真地反映了褐飞虱种群的迁飞动态。

2.1.1　迁出虫源地的分析：经过对 144 条轨迹的综合分析发现：理论上主虫源区基本上都是一个，即 22.5°N～27°N，110°E～116°E 之间、以东西向为长轴，南北向为短轴、面积约为 495 km×660 km的矩形区域，种群迁出密集区中心点位于（25°21′N，112°25′E），从该区迁出的概率为 0.9167。次级虫源区有两个：一个是赣西北与鄂东南交界的地区，中心点在

(29°N, 114°E) 左右，该区范围最小，面积约 10 km×20 km，迁出概率为 0.0417；另一个是赣东南与粤东北交界的地区，中心点在（27°N，118°E）附近，面积约 20 km×20 km，迁出概率为 0.0416（图略）。从两次过程各时次上升气流的最大影响范围来考虑，主虫源区的分布区域为：南界理论上可达 21°47′N，但实际上该处已位于海上，不能形成迁出事实，故研究中取陆地上上升气流超过昆虫主动迁飞速率的最南界（22.5°N）作为主虫源区南界；北界有一例达 27°38′N（统计时未考虑），其它都在 27°N 以南；西界为 110°16′E，东界为 116°E（有一例达 116°11′E，统计时未考虑）（图3:b）。因此，由该模型模拟出的虫源区与根据实际虫情资料推断分析出的结果（图3:a）比较吻合。

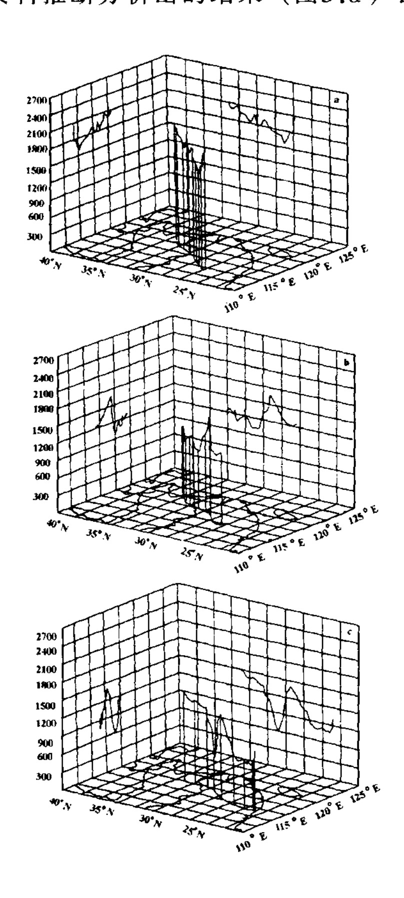


图 2 1991 年 7 月褐飞虱两个典型北迁过程的部分轨迹

a. 13 日 16 时始迁；b. 13 日 20 时始迁；c. 20 日 16 时始迁

Fig. 2 Some trajectories modeled from two typical events of *N. lugens*' migration which occurred in July of 1991 a. Emigrated at 16:00 on 13th; b. Emigrated at 20:00 on 13th; c. Emigrated at 16:00 on 20th

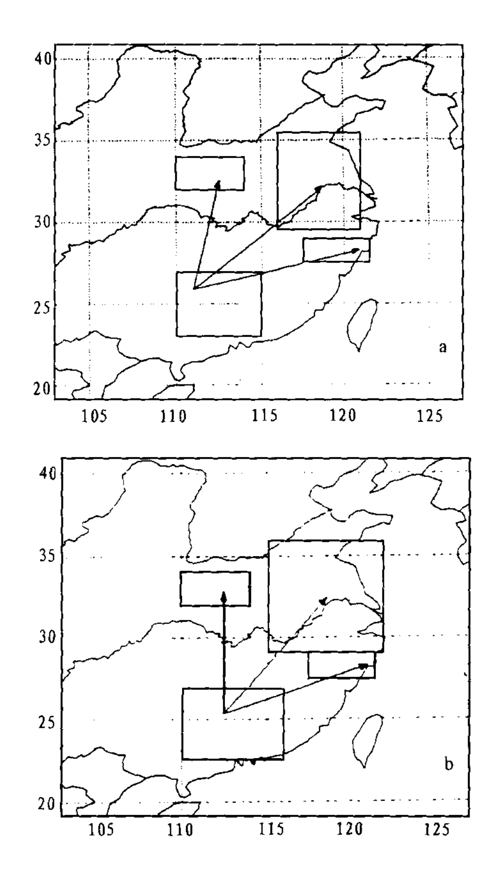


图 3 两次北迁过程的虫源地、迁飞路径和降落区分析与模拟

a. 由实测虫情资料推断分析的结果；b. 由 MM4 模式模拟的结果

Fig. 3 Analysis and simulations for emigrating sources, migrating path and immigrating regions of BPH population for the two events a. Inference and analysis of practical investigation; b. Simulations from MM4

2.1.2　空中迁飞路径的分析：由主虫源区迁出的褐飞虱一般取三条路径：（1）迁飞主径为东北稍偏北方向，即从源区出发经桂东北、赣西，过皖南到达皖中和江苏境内，降落时可波及鄂东、皖北、鲁豫南部、上海和浙北一线范围内。该路径的轨迹起点与终点连线的平均方位角为 32°左右，变化于 18°～54°之间，众值为 33°左右，占总轨迹数的 70.4%；（2）第一副径为偏北方向，即从源区出发经湘南、鄂西南到达川东北和鄂西北地区，轨迹平均方位角为 9°53′，变化于 −15°～15°之间，众值为 10°左右，占总轨迹数的 18.8%；（3）第二副径为偏东方向，即从源区出发经赣南、粤北，到达浙东南和闽北地区，轨迹平均方位角为 75°36′，变化于 60°～85°21′之间，众值 75°左右，占总数的 10.8%（图 3）。

2.1.3　迁入降落区的分析：模拟发现，在 144 条从理论虫源地迁出、取不同路径完成迁飞历程的褐飞虱轨迹中，不管南端的起点在何处，但北端的落点都分布在三个密集区内。其中主降区在长江中下游稻区，即 29°N～36°N，115°E～122°E 之间，且轨迹北端落点在该区内以（32°22′N，118°37′E）为中心呈内密外疏分布，降落概率为 107/144；第一副降区为川东北和鄂西北稻区，即 32°N～34°N，110°E～114°E 之间，轨迹落点密集中心在（32°19′N，112°29′E），降落在该区的概率为 19/144；第二副降区为浙东南和闽北稻区，即 27°N～29°N，117°30′E～121°30′E 之间，落点区中心在（28°16′N，120°58′E），在该区降落的概率为 18/144（图 3:b）。

2.2　理论研究结果与实测虫情资料的对比分析

首先，从虫源地研究来看，理论上主要虫源区在 22.5°N～27°N，110°E～116°E 之间，迁出起点密集分布在以点（25°21′N，112°25′E）为中心的内密外疏的矩形区域内，实测主虫源区在 23°N～27°N，110°E～115°E 之间，相应的中心点在（25°56′N，111°07′E），两者基本一致（图 3），只是理论源区稍大些。两虫源中心纬向偏差 144.33 km，经向偏差 64.22 km，直线距离为 157.86 km。在所计算的 144 条轨迹中，有 129 条南端在实测主虫源区内，有 7 条离实测主源区外缘不足 70 km，另外 8 条可能因散迁从“次级虫源区”迁出，可见吻合率达 90%以上。

其次，从迁飞路径和降落区域来看，模拟出的主径、第一、第二副径在 144 条轨迹中除 8 条“散迁”轨迹外其余均与由多年虫情资料判断分析的结果基本一致（图 3），吻合率达 94.44%。降落区域与虫情资料分析基本吻合，两个副降区外缘与实测完全一致，理论主降区（包括波及区）东、西、南三界与实际相合，北界比实测推断的稍北些，纬度上相差 43′，即 90 km左右。实测主降区最大概率中心在（31°57′N，118°31′E），理论主降区相应中心在（32°22′N，118°37′E），两者直线距离相差 70.28 km。

上述对比分析表明：MM4 是一种比较理想的轨迹模拟工具，同时笔者在本研究中对不同迁飞参数的选择也比较合理。

3　结论与讨论

本研究应用 MM4 模式，引进控制和影响褐飞虱迁飞过程的生理生态参数，结合三维轨迹计算方法模拟得到了 1991 年 7 月发生在我国局部地区的两个典型褐飞虱北迁过程的三维轨迹 144 条，分析研究后发现：

（1）盛夏褐飞虱的迁出虫源地主要在 22.5°N～27°N，110°E～116°E 之间约 500 km×650 km 的区域内。迁出后空中飞行路径有三条：主径取东北偏北方向，水平方位角 32°左右；第一副径取正北偏东方向，方位角 10°左右；第二副径取正东偏北方向，方位角 75°左右。褐飞虱种群迁飞后的降落区域有三个：主降区为长江中下游稻区；第一副降区为鄂西北和川东北稻区；第二副降区为浙东南和闽北稻区；为害的重灾区在 30°N～34°N，116°E～120°E 之间。

（2）盛夏褐飞虱迁出迁入的初始时刻都在 16 时左右，高峰时刻在 18～20 时之间，终止时刻为 22 时左右。

（3）MM4 模式是一个时空分辨率较高的中尺度动力数值预报模式，其水平格距可在 30 到 150 km 之间调放，垂直方向从地面到 100 hpa 之间可分成若干层，在时间上可分辩 30 s 到 36 h 之间各种时间间隔的气象要素和大气物理量的变化状况。三维轨迹计算方法是反映大气质点或空中风载浮游物移动状况及其时变特征的有效方法之一。应用它们作昆虫迁飞轨迹模拟时，只要选择合适的初始迁飞参数和运行限制条件就可以获得一些令人满意的研究结果。本研究理论模拟与实测推断分析的逼近，正好说明了这一点。

（4）本研究在褐飞虱迁出与迁入时刻、上升与降落机制、成层的空间范围等方面考虑了它在生理上的主动适应性，其合理性有待进一步探讨。

参 考 文 献（References）

[1] Reap R M. An operational three-dimensional trajectory model. J. Appl. Met. 1972，11：1193～1202

[2] Demio R P *et al*. Spring weather pattern associated with suspected black cutworm introduction to Iowa. J. Environ. Ent. 1987，12：1863～1871

[3] Wolf W W，Westbrook J K，Sparks A N. Relationship between radar entomological measurements and atmospheric structure in south Texas during March and April 1982. In：Sparks A N. ed. Long-range Migration of Moths of Agronomic Importance to the United States and Canada：Specific Examples of Occurrence and Synoptic Weather Patterns Conducive to Migration，Washington：USDA/ARS-43. 1987，98～104

[4] 胡继超，程极益等. 褐飞虱在我国东部地区秋季回迁的三维轨迹研究. 中国农业气象，1997，18（5）：1～6

[5] 包爱东. 昆虫雷达应用初探. 江苏省首届青年学术年会论文集. 北京：中国科学技术出版社，1992：347～352

[6] 程遐年等. 褐飞虱在中国东部秋季回迁的雷达观察. 南京农业大学学报，1994，17（3）：24～32

[7] 程极益，包云轩等. 冀东稻飞虱暴发的轨迹分析. 中国农业气象，1994，15（1）：2～5

[8] 程极益，包云轩等. 褐飞虱迁飞轨迹研究. 南京农业大学学报，1995，18（3）：60～67

[9] Anthes R A，Hsie E-Y，Kuo Y-H. Description of the Penn./NCAR Mesoscale Model Version4（MM4）. NCAR TECH. Note，1987，NCAR/TN-282+STR. 1～65

[10] Karyampudi V M and Carlson T N. Analysis and numerical simulation of the Saharan air layer and its effect on easterly wave disturbances. J. Atmos. Sci. 1988，45（21）：3 102～3 136

[11] Westphal D L，Toon O B and Carlson T N. A case study of mobilization and transport of Saharan dust. J. Atmos. Sci. 1988，45（15）：2145～2175

[12] 沈　岩，葛孝贞. 不同精度的水汽平流输送格式对台风运动影响的数值试验. 南京大学学报 1996，32：216～223

[13] 葛孝贞，李　峰. 改进的 MM4 模式暴雨实例对比试验. 气象科学，1996（2）：103～109

[14] 刘春涛，程麟生. 黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验. 气象学报，1997，55（6）：726～739

[15] 朱艳秋，廖洞贤. 三维空气质点轨迹的计算. 应用气象学报，1992，3（3）：328～333

[16] 包云轩，程极益，程遐年. 盛夏褐飞虱北迁大发生的气象背景：个例分析. 南京农业大学学报，1999，22（4）：35～40

Dynamical and numerical simulations on the processes of *Nilarparvata lugens* long-distance migration northward during the midsummer in China

BAO Yun-xuan[1]，CHENG Ji -yi[1]，CHENG Xia-nian[1]，CHU Chang-shu[2]，SHEN Tong-li[2]
（1. Nanjing Agricultural University，Nanjing　210095；2. Nanjing Meteorological Institute，Nanjing　210044）

Abstract: Based on the two migration events of *Nilaparvata lugens*（Stål）population，which had led to its serious infestation on rice in Changjiang valley，the main rice-growing regions in midsummer of 1991，and introduced into certain physiological and ecological parameters controlling the migration，a dynamical and numerical prediction model with higher spatio-temporal detectablity——MM4 and a means of calculating for 3-D trajectory were used to model the dynamic state of their migrating northward . The simulations and the comparisons between the simulations and the practical pests investigation showed:（1）The emigrating resource was an area from 22.5°N to 27°N on latitude and from 110°E to 116°E on longitude.（2）There were three spatial migratory paths，which consisted of a main path with an azimuth of about 32° and two assistant paths of about 10° and 75° respectively on azimuth.（3）There were three immigrating and descending regions with a main region situated in the middle and lower reaches of Changjiang valley，an assistant region joined northwestern Hubei with northeastern Sichuan and another assistant region enclosed southeastern Zhejiang and northern Fujian.（4）The conformity between the simulations and the practical pests investigation just illustrated that this model is an important means for the exploration of migratory pests' catastrophic mechanism.

Key words: *Nilaparvate lugens*（Stål）migration；dynamical and numerical simulations；3-D trajectory analysis；migration parameters；catastrophic mechanism